

ÁREAS DE APLICACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS 'SIG'. MODELIZACIÓN Y AVANCES RECIENTES

*Camelo Conesa García **

Universidad de Murcia

RESUMEN

En los últimos años el empleo de la tecnología SIG ha crecido muy considerablemente dentro del ámbito de las ciencias medioambientales. En este trabajo se presentan, a modo de síntesis, las principales áreas de aplicación medioambiental, dedicando especial atención a la integración de SIGs y modelos específicos recientemente desarrollados en cada una de ellas: modelos de interacción suelo-planta-atmósfera, modelos de flujos superficiales y subsuperficiales, modelos digitales de elevación, métodos de evaluación ambiental (riesgos de contaminación, erosión, degradación de masas forestales,...), etc.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, medioambiente, modelización, aplicaciones.

SUMMARY

During the last years the use of GIS technology has increased substantially into the environmental sciences. This paper summarizes the main environmental application areas, specially the integration of GIS and specific models developed in these areas: models of soil-plant-atmosphere interactions, surface-subsurface flow modeling, environmental assessment systems (risks of contamination, erosion, forest degradation,...), etc.

Key words: Geographic Information Systems, environment, modeling, applications.

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen numerosas ventajas respecto a la cartografía convencional, puesto que de forma automática permiten manejar datos espaciales internamente referenciados, producir mapas temáticos y procesar información de tipo digital. Desde la aparición del primer SIG, el 'Canadian GIS', hace unos 28 años,

Fecha de Recepción: 15 de junio de 1996.

- * Dpto. de Geografía Física, Humana y Análisis Geográfico Regional. Facultad de Letras. Universidad de Murcia. Apto. 4021 - 30080 Murcia (España).

diferentes centros de investigación dentro del ámbito anglosajón han venido utilizando los SIG en tareas que requieren el procesamiento de grandes volúmenes de datos espaciales. La experiencia anglo-americana puede considerarse como un claro reflejo del amplio rango de usos de esta tecnología (Tomlinson, 1987, Star y Estes, 1990, Fedra, 1993). Un lugar destacado, dentro de dicho ámbito, lo ocupan las aplicaciones SIG a estudios de carácter medioambiental, referentes a planificación y protección ambiental, procesos subaéreos, modelización hidrológica, topografía y geomorfología. En todas estas áreas de aplicación se desarrollan modelos de simulación de procesos y métodos de análisis, que pueden ser integrados en SIGs de diferente estructura. Espacio múltiple y escala temporal son dos conceptos fundamentales en la modelización medioambiental de sistemas integrados (p.e. modelos de interacciones suelo-planta-atmósfera, modelos hidrológicos, de riesgos naturales, etc.). En el presente trabajo se muestran las áreas medioambientales en las que los SIG están teniendo mayor desarrollo. Muy probablemente el rápido avance de esta técnica permitirá, en un futuro próximo, analizar procesos naturales más complejos como los que, por ejemplo, estudia la oceanografía física o la meteorología a escala global.

GEOSISTEMAS DE INFORMACIÓN AMBIENTAL

Dentro de las distintas áreas de aplicación de los geosistemas de información ambiental (GIA), pueden distinguirse básicamente aquéllas que se refieren al entorno municipal, a la administración territorial o regional y a espacios continentales. En el ámbito local, se realizan normalmente estudios de contaminación por gases y por ruido, contaminación de aguas, recogida de basuras, parques y jardines, etc. En el regional, figuran los estudios de impacto ambiental (Schaller, 1990), calidad de aguas, proyectos de infraestructuras, parques naturales, etc. A escala global o continental, la puesta en marcha, a partir de los 80, de programas de actuación medioambiental, auspiciados por distintas organizaciones internacionales, ha hecho necesario automatizar el tratamiento de datos, dando origen a los llamados geosistemas técnicos de información ambiental. En Norteamérica han sido utilizados por el Canadian *Wildlife Service* para analizar los efectos que el sobrecalentamiento de la atmósfera podría producir sobre los ecosistemas terrestres (Aronoff, 1989). En la misma línea se hallan los trabajos del UNEP (United Nations Environment Program) para coordinar los datos sobre clima, oceanografía, recursos renovables y polución a nivel global. En Europa destaca el proyecto CORINE (Coordinated *Information in the European Environment*) (1985-1990), encargado de recopilar y conjuntar la información existente sobre medioambiente y recursos naturales para ayudar en la toma de decisiones comunitarias sobre temas de esta índole, así como los trabajos de la compañía Siemens *Nixdorf* que, junto con el Estado de Baviera (Alemania), ha puesto en marcha un Geosistema de Información Ambiental (Ochoa Fernández, 1992).

En planificación medioambiental el SIG suele utilizarse para preprocesar datos, cartografiar datos de entrada o modelizar resultados. En la práctica, las estructuras de datos SIG guardan mayor relación con los mapas que los elementos finitos de los modelos medioambientales, por lo que es aconsejable un lenguaje de modelización medioambiental que sirva de interface al SIG (Goodchild, 1993). Este lenguaje debe permitir trabajar con representaciones simbólicas de variación geográfica continua, combinar tales variables y,

en la medida de lo posible, evitar salidas de representación digital discreta. En esta línea, Harris et al. (1993) adopta un SIG integrado con un modelo tridimensional de elementos finitos para estudiar la contaminación de acuíferos en la Cuenca del San Gabriel. ICF Kaiser Engineers Inc. introduce con Intergraph soluciones de cálculo tridimensional avanzado en el análisis de problemas medioambientales, tales como la caracterización de componentes químicos en flujos subsuperficiales y la evaluación de alternativas de control o medidas de protección (fig. 1). La primera imagen de esta figura muestra una perspectiva isométrica de una planta química cerca de un lago de recreo. En ella se observan las superficies de techo y muro del acuífero generadas con aplicaciones MGE (*Modular GIS Environment*) de Intergraph, así como los lugares de muestreo (cubos blancos) dentro de la formación. La imagen superior derecha muestra la dispersión de dos contaminantes dentro del acuífero: tricloroetileno (color púrpura) y cloroformo (amarillo). En la tercera imagen puede verse cómo se mezclan ambos contaminantes, y en la cuarta el volumen que representa la intersección de sus concentraciones por encima de los límites de la USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). Los SIG tridimensionales han sido empleados también para estudiar la contaminación subsuperficial en depósitos de residuos industriales y vertidos de petróleo en el mar (Fisher y Wales, 1991, 1992).

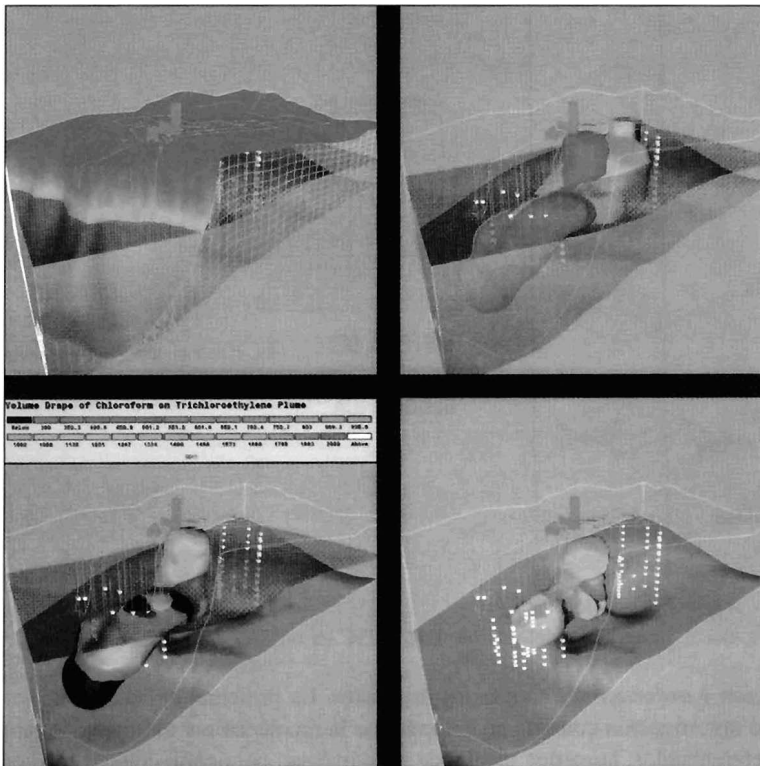


FIGURA 1. Modelización tridimensional de la pluma de dos contaminantes en un lago de recreo. ICF Kaiser Engineers Inc. (Intergraph, 1994).

En repetidas ocasiones, la USEPA ha adoptado el denominado índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1985) para evaluar a nivel regional la vulnerabilidad del agua subterránea a la polución y para elaborar programas de seguimiento de este tipo de procesos. DRASTIC es un método de ponderación numérica que considera la profundidad del nivel piezométrico (D), la tasa neta de recarga (R), el medio acuífero (A), las características del terreno (S), la topografía (T), el impacto de la zona de *vadose* (I) y la conductividad hidráulica (C), variables que pueden ser fácilmente implementadas en un SIG o Geosistema de Información Ambiental (fig. 2).

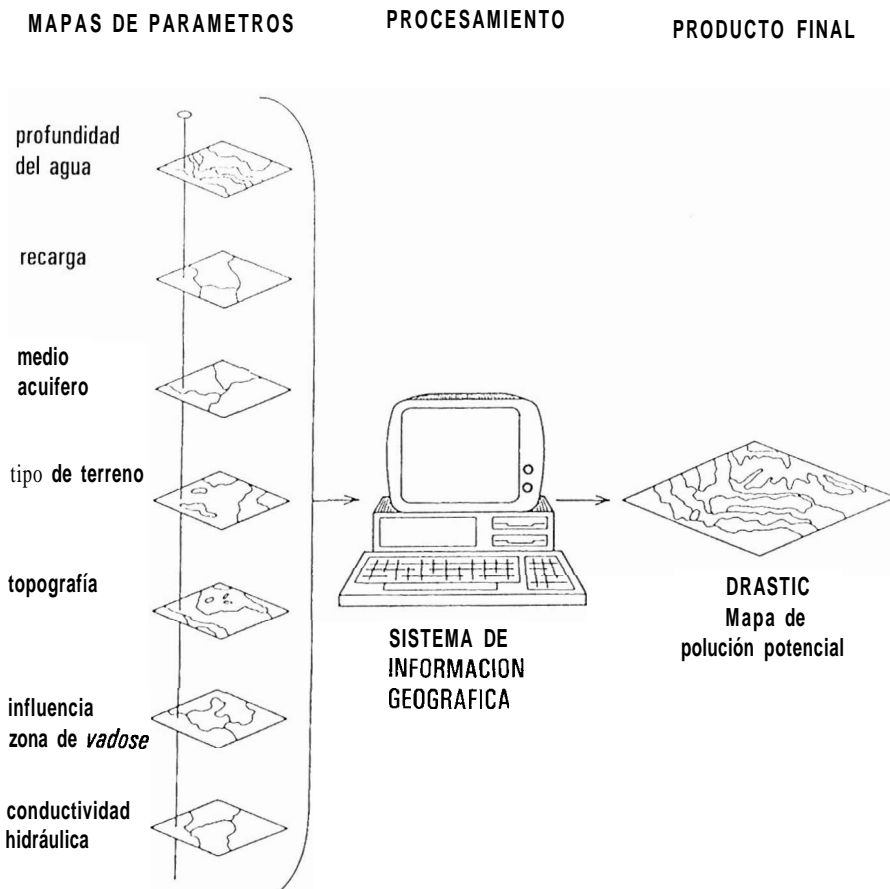


FIGURA 2. Integración del modelo DRASTIC en un SIG. Esquema conceptual.

Protección y ordenación de espacios forestales. La principal aplicación de los SIG en este área de investigación consiste en automatizar la recolección y el manejo de abundantes datos georeferenciados, tarea que resulta de gran utilidad para confeccionar y actualizar los inventarios forestales, planificar la explotación de bosques, definir sectores con distinto riesgo de incendios o establecer áreas de posible reforestación. Entre estas aplicaciones, es la

prevención de incendios forestales la que más interés ha suscitado en los últimos años, sin duda por las importantes secuelas ecológicas y pérdidas económicas que conlleva este fenómeno. La utilidad de los SIG en este sentido ha sido puesta de manifiesto por numerosos autores (Yool *et al.*, 1984, Hamilton *et al.*, 1989, Chuvieco y Congalton, 1989). Un ensayo práctico mediante teledetección y SIG, realizado en el Sureste de la provincia de Ávila, se presenta en el trabajo de Salas y Chuvieco (1992). Estos autores cartografiaron y analizaron distintas variables asociadas al inicio y propagación del fuego, elaborando finalmente un mapa de síntesis sobre probabilidades de incendios en dicho área. Otras tareas de los SIG instalados en servicios forestales guardan también relación con la gestión de recursos medioambientales (ecosistemas a proteger) (fig. 3) y con la conservación de nuestro patrimonio cultural. Importantes resultados han sido obtenidos en Parques Naturales que disponen de este tipo de sistemas, como son, entre otros muchos, el George Washington Memorial Parkway, Bryce Canyon Natural Park o el Biscayne National Park. En relación con esta problemática ha sido editado un workbook (McKendry *et al.*, 1994), que examina el papel de los SIG en la evaluación y planificación de los recursos forestales.

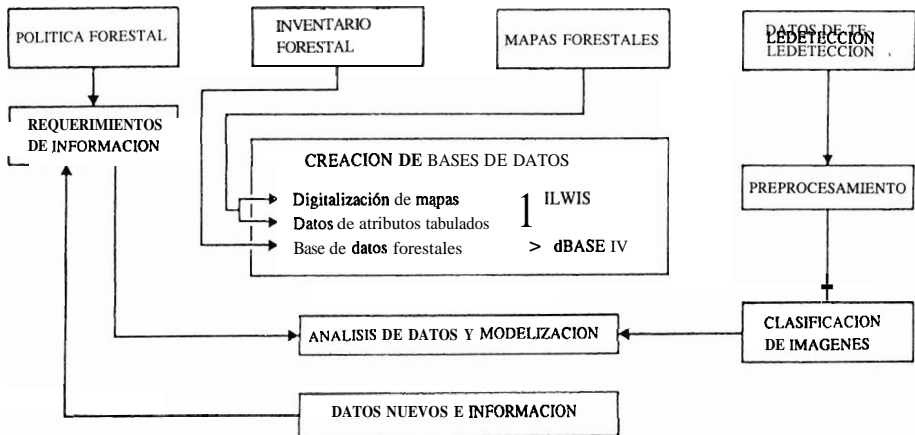


FIGURA 3. Organización de un SIG orientado a la gestión forestal.

SIG Y MODELOS ATMOSFÉRICOS

Diversas simulaciones llevadas a cabo en los últimos años han puesto de manifiesto la importancia de las características de la superficie terrestre en relación con las interacciones tierra-atmósfera, el clima y las predicciones del tiempo. Ello explica que muchos modelos atmosféricos hayan incorporado ya en su diseño una parametrización de los procesos superficiales (Entekhabi y Eagleson, 1989, Avissar, 1992, 1993). En estos modelos, la variabilidad espacial de los parámetros del sistema atmósfera-planta-suelo, que afecta la entrada y redistribución de energía y agua en la superficie terrestre, suele ser representada mediante funciones de densidad de probabilidad. Parámetros tan importantes como la disponibilidad de agua evapotranspirable, la rugosidad superficial, la topografía y el índice de área folial son implementados en ecuaciones de determinados modelos para

producir, a escala «*grid*» (SIG *raster*), los flujos de energía que influyen en los niveles inferiores de la atmósfera (Avissar, 1993).

A través de técnicas de modelización atmosférica pueden estudiarse también los efectos de los cambios en los usos del suelo y su heterogeneidad espacial sobre los sistemas meteorológicos y climáticos (Lee *et al.*, 1993). Los SIG ofrecen posibilidades de operar con amplias bases de datos referidas a la superficie terrestre a escala global y regional, y ello, unido al desarrollo de datos geo-referenciados, mejorará en un futuro próximo, la capacidad de modelizar la respuesta del clima global a los cambios medioambientales inducidos por el hombre.

SIG Y APLICACIONES HIDROLÓGICAS

En hidrología la tecnología SIG ha estado orientada básicamente en torno a tres líneas de investigación: recursos hídricos, calidad de aguas y riesgos de inundación.

1. Un ejemplo del primer tipo de aplicación llevado a cabo en España es el trabajo de Mendizábal *et al.* (1992) sobre evaluación de *recursos hídricos* en los Planes Hidrológicos del Tajo y de Galicia Costa. Por medio del modelo 3D de ARC/INFO estos autores modelizaron la precipitación y la evapotranspiración (ETP) en cada subcuenca. Las series obtenidas fueron empleadas directamente como datos de entrada de un modelo hidrológico de conversión lluvia-escurrentía (SACRAMENTO), desarrollado en su versión original por el *National Weather Service* del *U.S. Department of Commerce*.
2. En relación con la calidad de las aguas fluviales en las tierras altas de Austin (Texas), el *Landowner AMCOR Investments Corporation*, y el *Centre Development Company, Inc.*, definió, a través de ERDAS, calidades críticas del agua y zonas «*buffer*» de acuerdo con el tamaño del área vertiente de las llanuras de inundación (ERDAS, 1990a).
3. La implementación de SIG para el estudio de riesgos hidrológicos es más frecuente dentro y fuera de nuestro país. Utilizando ARC/INFO, García Manrique y Galacho Jiménez (1992) lograron definir varias áreas inundables en el sector Oeste de la ciudad de Málaga. En dicho trabajo se delimitan las áreas que quedarían afectadas, en momentos de grandes avenidas del río Guadalhorce, según diversos supuestos, conforme a una previsión de que las aguas alcancen, sobre el lecho actual del río, diferentes alturas. Combinando este SIG con el Modelo Digital del Terreno «*Quick-Surf. Generic Contouring Utility para Autocad*», una vez digitalizada y corregida la cartografía básica, extrajeron la totalidad de las cotas de altitud y, posteriormente, las alturas relativas sobre el lecho del río. Éstas se relacionaron con distintos supuestos de nivel de agua y usos del suelo afectados para generar una cartografía de riesgos por inundación en el citado sector. Cuando se emplea un SIG *raster* y los cursos tienen un trazado rectilíneo o poco sinuoso, de dirección O-E o E-O, un procedimiento útil para calcular las alturas respecto a su lecho, consiste en restar a las altitudes representadas en cada columna de la imagen la parte de deriva correspondiente al desnivel longitudinal del talweg y la altitud mínima del cauce tomada como valor constante. Para ello, se divide el lecho en tramos de pendiente homogénea y longitud reducida (p.e. ≤ 100 m), en los

que se establece el desnivel medio aplicable por columna. De esta forma, son asumidas las variaciones locales existentes a lo largo del perfil y disminuye la probabilidad de error en la obtención de cotas referenciadas al lecho (Conesa García et al., 1996). La imagen resultante es reclasificada según diferentes situaciones de flujo, atendiendo básicamente al nivel de agua alcanzado en secciones de geometría hidráulica conocida, próximas a los puntos potenciales de desbordamiento. Para el mismo modelo de cauce, dotado de una dirección N-S o S-N la deriva de la pendiente se deduce considerando tramos de filas en lugar de columnas. En IDRISI la determinación de las alturas o niveles críticos de desbordamiento puede realizarse superponiendo la imagen «*watshed*» a la de alturas relativas al lecho, operación que permite localizar, a lo largo de la línea divisoria de ambas áreas de drenaje (área desbordable y área inundable), las cotas topográficas mínimas que las separan. Una vez establecidos los niveles mínimos de desbordamiento, es posible deducir la capacidad máxima de desagüe del curso en cada punto de su recorrido. Este tipo de análisis aparece ampliamente desarrollado en el workbook Applications in Hazard Assessment and Management' (Ed. Emani, 1994), donde se muestran las variadas posibilidades del SIG en la identificación, valoración y planificación de riesgos naturales y técnicos. Un ejemplo de esta aplicación es la imagen obtenida por el Departamento de Geomorfología y Geología del ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences) a través de ILWIS (Integrated Land and Water Information System) (fig. 4).

En la mayoría de los modelos hidrológicos las estructuras de mallas se emplean como una representación de diferencia finita de los procesos planares de corriente, tales como la migración de una capa acuífera o la laminación de una crecida. Las redes de diferencia finita son denominadas «*mesh-centered*» o «*block-centered*», dependiendo de que las variables condicionadas sean procesadas en los puntos nodales o en los centros de los rectángulos respectivamente. Este tipo de modelización se aplica particularmente a la hidrología subterránea, a través de modelos hasta ahora bastante complejos y de solución no estandarizada.

Recientemente se han realizado numerosos estudios sobre los rasgos hidrológicos de distintas superficies de terreno a partir de modelos de elevación digitales. Las mejores rutinas conocidas en este sentido han sido desarrolladas por Sue Jenson en el U.S. Geological Survey (Jenson y Dornique, 1988; Jenson, 1991). Estos procedimientos están basados en un modelo «*pour-point*», en el que el agua localizada en un pixel fluye hacia el más bajo de los ocho píxeles adyacentes (cuatro en los ejes de coordenadas y cuatro en los diagonales). Siguiendo la trayectoria del movimiento simulado del agua, de cuadrado a cuadrado, se trazan los accesos hipotéticos de la corriente; a partir de ellos, pueden establecerse los límites del área de drenaje. Esta aproximación es útil para estudiar superficies vertientes en áreas rurales, pero, en cambio, tiene una utilidad muy limitada en zonas urbanas, en las que la interposición de edificios y calles impiden la trayectoria recta en dirección aguas abajo, tal como requiere la aplicación de dicho modelo. La orden WATRSHEDE de IDRISI permite realizar este tipo de operaciones a partir de imágenes de orientación previamente creadas mediante el comando «*aspect*» del módulo SURFACE. Conesa et al. (1996) han empleado esta opción para delimitar áreas de drenaje relacionadas con tramos de desbordamiento en la rambla de Nogalte (Cuenca del Segura).

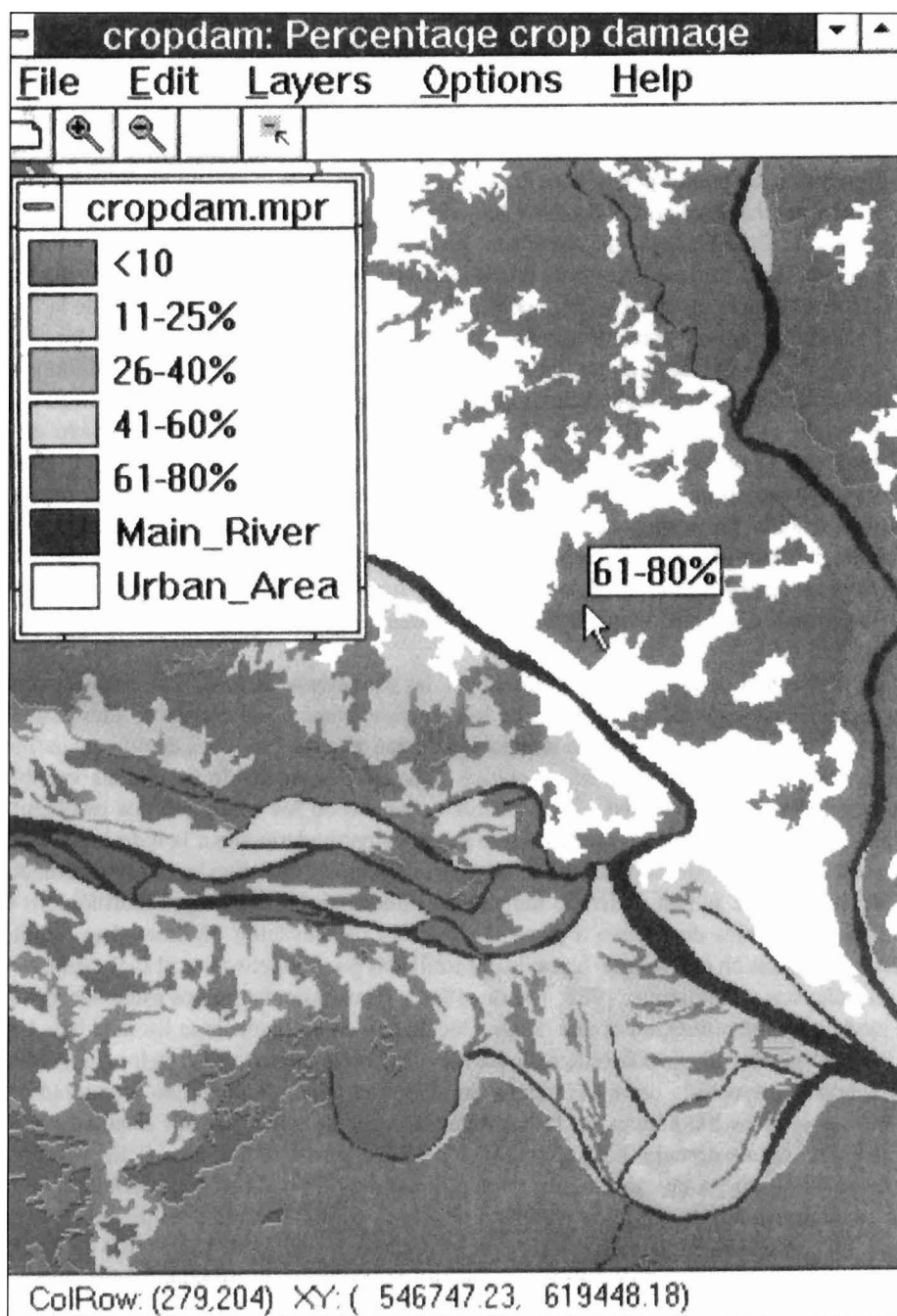


FIGURA 4. Mapa de valoración de riesgos de inundación en Bangladesh y alrededores, obtenido con ILWIS. Base de datos proporcionada por el *Dep. of Geomorphology and Engineering Geology (ITC)*.

Otros parámetros utilizados en modelos de **hidrología** superficial, como son la longitud y pendiente de los cursos de agua (Tarboten, Bras y Rodríguez-Iturbe, 1991) sirven también para calcular los tiempos de concentración de la escorrentía (T_c) en cada una de las áreas definidas con WATRSBED. La estimación de T_c puede realizarse por distintos métodos entre los que destaca la fórmula-promedio de Basso, Kirpich, Instrucción de Carreteras y California:

$$T_c = 0,067 \cdot L^{1,155} \cdot H^{-0,385}$$

donde L es la longitud del cauce y H su desnivel absoluto, ambos expresados en **kms**. L se calcula a través de la función DISTANCE de IDRISI, que utiliza una ecuación de distancia euclidiana, $D_{ab} = [(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2]^{0,5}$, en la que x e y son las coordenadas rectangulares que separan los puntos a y b (Bosque Sendra, 1992). Como píxeles de referencia se seleccionan los que ocupan las tierras más bajas de la cuenca o los puntos de desagüe, dando dos mapas de distancias con los que se combinan los mapas de desniveles deducidos a partir del modelo digital del terreno. Basta entonces con aplicar SCALAR para elevar L y H a sus exponentes respectivos y combinar la información digital de los mapas resultantes (pixel a pixel) mediante la opción «multiplicar» de OVERLAY.

Los caudales máximos instantáneos correspondientes a sucesos hidrológicos simulados y reales (avenidas históricas) pueden deducirse aplicando la fórmula de Chèzy-Maning, $V = (1/n) \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$, a partir de los niveles de agua alcanzados en cada caso, siendo n el coeficiente de rugosidad del lecho, R el radio hidráulico y S la pendiente longitudinal del cauce. Para ello, los datos de geometría hidráulica obtenidos con PROFILE deben complementarse necesariamente con mediciones en el campo (granulometría de los materiales de lecho, altura de la lámina de avenida, etc.). El caudal que circula por un cauce, más el que se desborda lateralmente, condiciona la altura del flujo y, por tanto, la superficie del área mojada y el radio hidráulico aguas abajo. Conociendo la altura alcanzada en avenidas históricas o con tiempos de retorno específicos, pueden calcularse los caudales parciales correspondientes a los mismos, siempre que se disponga de un MDT preciso y se minimice el error derivado del empleo de n (factor de fricción) en las ecuaciones de velocidad.

Un avance importante ha sido la integración de SIGs con modelos de flujos de superficie/subsuperficie, como el FESHM (Finite Element Storm Hydrograph Model) (Shanholtz et al., 1990), el ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) (Engel et al., 1991) y el AGNPS (Agricultural Non-Point Source pollution) (Panuska et al., 1991). En esta línea, Alonso Sarría (1995) utiliza IDRISI para realizar una caracterización hidromorfológica de la cuenca de Rambla Salada (Murcia) y, en relación con ella, define tres módulos de información (módulo de precipitación, de interceptación-infiltración y de escorrentía) para generar un modelo de conversión lluvia-escorrentía. Como modelo de respuesta hidrológica de la cuenca adopta el Hidrograma Unitario Instantáneo y como función proceso-respuesta el modelo de Nash o función gamma de dos parámetros, estimados a partir de las características geomorfológicas introducidas en el SIG.

SIG Y ANÁLISIS MORFOLÓGICO

La Topografía es un condicionante básico en el desarrollo de los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Sus atributos primarios (elevación, pendiente y orientación) y mixtos (obtenidos por la combinación de dos o más primarios) caracterizan la variabilidad espacial de procesos específicos en el modelado. Estos atributos pueden ser procesados a partir de un DEM (*Digital Elevation Model*) utilizando técnicas de análisis del terreno y almacenados como un Modelo Digital del Terreno (MDT) en un SIG (Moore et al., 1991). Existen tres tipos de procedimientos para estructurar un DEM: a) Los métodos de celdas (malla triangular, cuadrada o rectangular espaciada o un «*grid*» regular angular). Generalmente proporcionan las estructuras más eficientes para estimar los atributos del terreno; b) Los TINs (*Triangulated Irregular Networks*) muestran puntos concretos de la superficie dispuestos en una red irregular que dificulta el análisis de los atributos; c) Los métodos vectoriales se basan en el trazado de curvas de nivel que son almacenadas como DLGs (*Digital Line Graphs*), pero no ofrecen ninguna ventaja de cálculo.

La gama de aplicaciones de estos modelos en el estudio de los procesos morfológicos es muy variada; incluye la definición de límites de cuencas y subcuencas, cálculo de áreas de drenaje, pendientes, forma de perfiles topográficos,...). Su incorporación en la investigación geomorfológica facilita, en opinión de Embleton y Liedtke (1990), la realización de múltiples tareas relacionadas con el análisis del terreno, identificación de geoformas, localización de áreas de riesgos geomórficos (deslizamientos, avalanchas de barro, desplomes), simulación de cambios morfológicos, relaciones topológicas y morfométricas, simulación de redes de drenaje, etc. Ello ha dado lugar, incluso, a la acuñación de conceptos tales como *Watershed Information System* (Band, 1989) o *Geomorphological Information System* (Barsch y Dikau, 1989) y a la implementación de S.I.G. específicos, como el utilizado por Carrara et al. (1991) o por Chacón et al. (1992) para analizar los riesgos derivados de los movimientos en masa. Estos últimos autores emplearon la versión 5.21 de SPANS (Intera-Tydac, Canadá) y el programa de digitalización PMTYDIG para elaborar una base de datos de movimientos en laderas, generar un MDT y trazar mapas de susceptibilidad del terreno a la movilización, zonas expuestas y riesgos. Este S.I.G. permite el tratamiento de datos vectoriales, «*raster*» y «*quadtree*», lo que le confiere una gran versatilidad.

González et al. (1994) han estudiado, mediante SIG y análisis estadístico multivariante, los factores que explican la distribución de geoformas, actualmente dinámicas, en alta montaña. Para ello, elaboran un MDT con el software ERDAS, versión 7.0, a partir del fichero vectorial de las curvas de nivel del mapa topográfico de Sallent (Alto Gállego, Pirineos) a escala 1150.000. Con la imagen de altitudes resultante, dotada de una resolución de 50 x 50 m de tamaño de celda *raster*, generan mapas de pendientes y exposiciones, a los que superponen la capa de información geomorfológica, integrada principalmente por formaciones activas (movimientos en masa, formas derivadas de la escorrentía superficial y fenómenos vinculados en cierta medida a contrastes térmicos y presencia persistente del hielo en el suelo). El tratamiento estadístico de esta información mediante un programa específico, ajeno al SIG, como es el SPSS, contribuye finalmente a jerarquizar los factores que definen las preferencias de localización de dichos procesos geomórficos.

Conesa García y López Bermúdez (1995) han aplicado también la tecnología SIG para ubicar las cárcavas de un badland situado en Rambla Salada (Campo Experimental de Los Guillemos, Murcia) y estimar las pérdidas globales de suelo producidas desde el inicio de su formación. En el mismo área se ha empleado IDRISI para estudiar variaciones micromorfológicas (rasgos microtopográficos, superficies de agrietamiento, etc.) en función de las características físicas y mineralógicas del terreno (Conesa García *et al.*, 1994).

SIG Y TELEDETECCIÓN APLICADA AL ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO

Las prestaciones de determinados S.I.G. en la lectura y análisis de imágenes de satélite son también importantes en el estudio del medio físico. Recientemente están apareciendo nuevos softwares y módulos de SIG que constituyen un gran avance para este tipo de investigación. Por ejemplo, el *Multivariate Image Analysis (MIA)*, un nuevo y potente módulo de ERDAS Rev. 7.4, ofrece una mejor demarcación de las condiciones de borde. MIA usa datos característicos (representados como grupos de píxeles), seleccionados en espacio estadístico, para realizar análisis de imágenes en espacio geométrico. Para aislar tales modelos de píxeles, el analista utiliza normalmente análisis de componentes principales (PCA) para reducir las bandas de datos múltiples en nuevas bandas que tienen el mayor rango de varianza estadística. Los valores de datos para píxeles individuales pueden ser identificados rápidamente al tiempo que los ejes de componentes principales son representados como diagramas de dispersión (ERDAS, 1990b). Esta estrategia resulta muy útil para establecer los siguientes tipos de límites y tratamientos:

- Contactos tierra-agua (medios húmedos).
- Zonas de transición (líneas de falla).
- Análisis vegetativo (identificación de vegetación mixta).
- Geociencia y análisis geoquímico de imágenes.
- Análisis de formaciones de hielo.

Para la identificación de diferentes tipos de hielo, varios investigadores del *Norwegian Computing Center* analizaron imágenes SAR de hielo marino por diversos procedimientos. Las imágenes SAR resultaron ser espectralmente mucho más uniformes cuando las examinaron con técnicas de análisis y procesamiento de imagen convencionales. En cambio, con los diagramas de dispersión de MIA, basados en características de bandas deducidas texturalmente, consiguieron diferenciar entre hielo de nueva formación, hielo de un año y hielo de varios años.

Otro módulo que ofrece grandes ventajas a los usuarios de SIG es el *ERDAS-ARC/INFO Live Link*, que combina capacidades de análisis geográfico potente con dos sistemas de estructura distinta: 1. ERDAS, capaz de realizar tareas de corrección geométrica y clasificación de información percibida remotamente (imágenes de satélite y fotografía aérea escaneada), así como análisis de datos *raster* ya existentes (p.e. MDT), 2. ARC/INFO, un SIG de ESRI de tipo vectorial, que permite a los usuarios almacenar mapas y datos tabulares asociados como una base de datos *cartográfica*. Esta aproximación integrada ha sido ensayada en numerosas áreas de aplicación. En Geografía Física, por ejemplo, ha sido

aplicada por **William Smith**, de la Universidad del Sur de Carolina, en un estudio de zonas húmedas. Este autor empleó ERDAS para clasificar áreas húmedas a partir de datos de Landsat TM, y ARC/INFO para leer datos referidos a las mismas áreas directamente a partir de ficheros DLG, escala 1:100.000, del USGS (ERDAS, 1990c). En 1994 Martin editó un *workbook* que recoge varios artículos sobre el papel de los S.I.G. y la teledetección en relación con la investigación y planificación de zonas costeras.

CONCLUSIONES

Actualmente la tecnología SIG está siendo aplicada en múltiples campos de las ciencias medioambientales: Climatología, Hidrología, Geología, Geomorfología, Ecología, etc. Su utilidad en estas disciplinas no sólo estriba en la realización de tareas de inventario, planificación y gestión, sino también en las ventajas que ofrece por su capacidad de integración con modelos específicos inherentes a cada una de ellas. El rango de modelización varía desde el simple empleo de SIGs como modelos conceptuales de realidad espacial hasta la adopción de módulos de análisis (superposición de coberturas, análisis de redes y áreas de influencia) y de procesamiento de imágenes.

Entre las áreas de aplicación más usuales dentro de este ámbito figuran los estudios de protección medioambiental, la caracterización y evaluación de riesgos naturales (inundaciones, deslizamientos, degradación del suelo,...) y antrópicos (residuos industriales y contaminación, incendios provocados,...), la elaboración de modelos hidrológicos integrados (flujos superficiales y aguas subterráneas) y el análisis morfológico. La integración de SIG con modelos de dinámica atmosférica presenta todavía hoy serias dificultades, sobre todo en lo que se refiere a los niveles superiores de la atmósfera, que apenas reflejan la incidencia de los procesos superficiales y subsuperficiales.

REFERENCIAS

- ALLER, L. *et.al.* (1985): «**DRASTIC**: a standard system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting», *Rpt. No. EPA/600/2-85/018*, Ada, OK: U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.
- ALONSO SARRÍA, F. (1995): *Análisis de episodios lluviosos y sus consecuencias hidrológicas sobre una cuenca mediterránea semiárida no aforada (Cuenca de la Rambla Salada, Murcia)*, Tesis Doctoral (inérita), Universidad de Murcia, 501 pp.
- ARONOFF, S. (1989): *Geographic Information Systems. A Management Perspective*, Ottawa, WDL Publications.
- AVISSAR, R. (1992): «Conceptual aspects of a statistical-dynamical approach to represent landscape subgrid-scale heterogeneities in atmospheric models», *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 2.729-2.742.
- AVISSAR, R. (1993): «An Approach to Bridge the Gap Between Microscale Land-Surface Processes and Synoptic-Scale Meteorological Conditions Using Atmospheric Models and GIS: Potential for Applications in Agriculture», en M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert (Eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, pp. 123-134.

- BAND, L.E. (1993): «A terrain-based watershed information system», *Hydrological Processes*, vol. 3, pp. 151-162.
- BARSCHE, D. y DIKAU, R. (1989): «Entwicklung einer Digitalen Geomorphologischen Basiskarte», *Geo-Information-System*, 3, pp. 12-18.
- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*, Edic. Rialp, Madrid, 451 pp.
- CARRARA, A., CARDINALE, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. y REICHENBACH, P. (1991): «GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard», *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, pp. 427-445.
- CHACÓN, J., IRIGARAY, C. y FERNÁNDEZ, T. (1992): «Análisis regional de movimientos de ladera y riesgos derivados mediante Sistemas de Información Geográfica», 1^{er} Congreso AESIGYT, *Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Territorial*, Madrid, pp. 355-360.
- CHUVIECO, E. y CONGALTON, R.G. (1989): «Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping», *Remote Sensing of Environment*, vol. 29, pp. 147-159.
- CONESA GARCÍA, C., LÓPEZ BERMÚDEZ, F. y ALONSO SARRÍA, F. (1994): «Morfometría de grietas de retracción en un badland del sureste semiárido peninsular», en J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar (Eds.), *Geomorfología en España*, Sociedad Española de Geomorfología, Logroño, pp. 41-54.
- CONESA GARCÍA, C. y LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1995): «The cubing of Gullies Using the GIS Methodology Applied to a Badland in South-East Spain», *Conference on Erosion and Land Degradation in the Mediterranean*, Proceedings, Mediterranean Erosion & Desertification, Aveiro, pp. 499-508.
- CONESA GARCÍA, C., ÁLVAREZ ROGEL, Y., BELMONTE SERRATO, F., VIVERO MARTÍNEZ, M^a.A. y RODRÍGUEZ TELLO, T. (1996): «Simulación mediante S.I.G. de áreas inundables en el tramo inferior de la Rambla de Nogalte (Cuenca del Segura)», *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*, Asociación de Geógrafos Españoles, Vitoria.
- EMANI, S. (Ed.) (1994): *Applications in Hazard Assessment and Management*, vol. 6, serie *Explorations in Geographic Information Systems Technology*, UNITAR, United Nations Environment Programme.
- EMBLENTON, C. y LIEDTKE, H. (1990): «Geomorphological mapping, remote sensing and terrain models», *Zeitschrift für Geomorphologie*, suppl. Bd. 80, pp. 1-5.
- ENGEL, B.A., SRINIVASAN, R. y REWERTS, C.C. (1991): «A GIS toolbox approach to hydrologic modeling», *Proceedings, GRASS 1991 User's Conference*, Berkeley, California.
- ENTEKHABI, D. y EAGLESON, P.S. (1989): «Land-surface hydrology parameterization for atmospheric general circulation models including subgrid-scale spatial variability», *Journal of Climate*, 2, pp. 816-831.
- ERDAS (1990a): *Application: Land Use Planning. The Uplands-Austin, Texas*, Atlanta, Georgia.
- ERDAS (1990b): *Application: Multivariate Image Analysis (MIA), A New Approach to Image Analysis*, Atlanta, Georgia.

- ERDAS (1990c): *Application: ERDAS-ARC/INFO Live Link, the Raster-Vector Integration*, Atlanta, Georgia.
- FEDRA, K. (1993): «GIS and Environmental Modeling», en M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert (Eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, pp. 35-50.
- FISHER, T.R. y WALES, R.Q. (1991): «3-D visualization in areas of complex geologic modeling», *Proceedings, Houston Geotech '91*.
- FISHER, T.R. y WALES, R.Q. (1992): «Three dimensional solid modeling of geo-objects using non-uniform rational B-Splines (NURBS)», en Turner, A.K. (Ed.), *Three Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- GARCÍA MANRIQUE, E. y GALACHO JIMÉNEZ, F.B. (1992): «Aplicación de tecnología SIG en la elaboración de una cartografía de las zonas de riesgo de inundación en el sector oeste de la ciudad de Málaga», V *Coloquio de Geografía Cuantitativa*, Zaragoza, pp. 115-126.
- GONZÁLEZ, C., ORTIGOSA, L., MARTÍ, C. y GARCÍA RUIZ, J.M. (1994): «Aplicación de técnicas S.I.G. al estudio de la organización espacial de procesos geomorfológicos en montaña», en J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar (Eds.), *Geomorfología en España*, Sociedad Española de Geomorfología, Logroño, pp. 365-377.
- GOODCHILD, M.F. (1993): «The State of GIS for Environmental Problem-Solving», en M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert (Eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, pp. 8-15.
- HAMILTON, M.P., SALAZAR, L.A. y PALMER, K.E. (1989): «Geographic Information Systems providing information for wildland fire planning», *Fire Technology*, vol. 25, pp. 5-23.
- HARRIS, J., GUPTA, S., WOODSIDE, G. y ZIEMBA, N. (1993): «Integrated Use of a GIS and Three Dimensional, Finite-Element Model: San Gabriel Basin Groundwater Flow Analyses», en M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert (Eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, pp. 168-172.
- INTERGRAPH (1994): *Legends*. Intergraph Corporation, Huntsville, USA, 63 pp.
- JENSON, S.K. y DOMINGUE, J.O. (1988): «Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), pp. 1.593-1.600.
- JENSON, S.K. (1991): «Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models», *Hydrologic Processes*, 5 (1), pp. 31-44.
- LEE, T.J., PIELKE, R.A., KITTEL, T.G.F. y WEAVER, J.F. (1993): «Atmospheric Modeling and Its Spatial Representation of Land Surface Characteristics», en M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert (Eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, pp. 108-122.
- MARTIN, K.S. (Ed.) (1994): *Applications in Coastal Zone Research and Management*, vol. 3, serie *Explorations in Geographic Information Systems Technology*, UNITAR, United Nations Environment Programme.

- MCKENDRY, J., EASTMAN, J.R., MARTIN, K.S. y FULK, M. (1994): *Application in Forestry*, vol. 2, serie *Explorations in Geographic Information Systems Technology*, UNITAR, United Nations Environment Programme.
- MENDIZÁBAL CARRILLO, A., RODRÍGUEZ MATEOS, E. y GARCÍA BERRIO, F. (1992): «Aplicación de SIG a la evaluación de recursos hidráulicos», 1^{er} Congreso AESIGYT, *Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Territorial*, Madrid, pp. 447-453.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. y LADSON, A.R. (1991): «Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications», *Hydrological Processes*, 5, pp. 3-30.
- OCHOA FERNÁNDEZ, C.J. (1992): «Geosistemas de Información Ambiental en la Administración», 1^{er} Congreso AESIGYT, *Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Territorial*, Madrid, pp. 161-170.
- PANUSKA, J.C., MOORE, I.D. y KRAMER, L.A. (1991): «Terrain analysis: integration into the agricultural non-point source (AGNPS) pollution model», *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, pp. 59-64.
- SALAS, J. y CHUVIECO, E. (1992): «¿Dónde arderá el bosque? Previsión de incendios forestales mediante un SIG», 1^{er} Congreso AESIGYT, *Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Territorial*, Madrid, pp. 430-446.
- SCHALLER, J. (1990): «Geographical Information System application in Environmental Impact Assessment», en H.J. Scholten & J.C.H. Stillwell (Eds.), *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*, Kluwer, The Netherlands, pp. 107-117.
- SHANHOLTZ, V.O., DESAI, C.J., ZHANG, N., KLEENE, J.W., METZ, C.D. y FLAGG, J.M. (1990): «Hydrologic/water quality modeling in a GIS environment», *ASAE Paper No. 90-3033*, St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 17 pp.
- STAR, J. y ESTES, J. (1990): *Geographic Information Systems. An introduction*, Londres, Prentice-Hall International.
- TARBOTEN, D.G., BRAS, R.L. y RODRÍGUEZ-ITURBE, I. (1991): «On the extraction of channel networks from digital elevation data», *Hydrologic Processes*, 5 (1), pp. 81-100.
- TOMLINSON, R.F. (1987): «Current and potential uses of geographical information systems. The North American experience», *International Journal of Geographic Information Systems*, vol. 1, 3, pp. 203-219.
- YOOL, S.R., ECKHARDT, D.W., ESTES, J.E. y COSENTINO, M.J. (1985): «Describing the brushfire hazard in southern California», *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 75, pp. 417-430.